



## Cálculo de la Inundación del Maremoto del Callao de 1746

CESAR JIMENEZ TINTAYA, Licenciado en Física, Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, División de Geofísica. Email: cesarsud86@hotmail.com

ERICK ORTEGA RAFAEL, Ing. Geógrafo, Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, Sala de Alerta de Tsunamis. Email: e\_ortega@speedy.com.pe

Recibido: 29 Agosto 2008 / Aceptado: 20 Noviembre 2008

### Resumen

El 28 de octubre de 1746 a las 22:30 hora local, la ciudad de Lima y el Callao fueron remecidas por un fuerte terremoto de magnitud 8.6 Mw e intensidad X en la escala de Mercalli, el epicentro se ubicó en el mar frente al Callao. El maremoto generado destruyó la ciudad del Callao y produjo la muerte de más de 5,000 personas, quedando sólo 200 sobrevivientes. A partir de catálogos históricos se obtienen los parámetros focales del terremoto, luego se calcula los parámetros del área de ruptura. Con la ayuda del modelo WinITDB se calcula la máxima altura de la ola del maremoto. De la ecuación de onda para aguas someras y con los datos de batimetría se calculan los tiempos de arribo de la primera ola. Para el cálculo del "run-up" o máxima altura de inundación, se utiliza un modelo dinámico y energético de una partícula. Este dato servirá para la elaboración de un mapa de inundación, el cual será de utilidad para efectos de mitigación del desastre por parte de las autoridades correspondientes.

**Palabras claves:** Maremoto, simulación, tiempo de arribo, run-up.

### Abstract

On October 28, 1746, at 22:30 local time, the city of Lima and the Callao were shaken by a strong earthquake of magnitude 8.6 Mw and intensity X in the Mercalli scale, the epicenter was located in the sea opposite to the Callao. The generated tsunami destroyed the city of the Callao and produced the death of more than 5,000 persons, remaining only 200 survivors. From historical catalogue the seismic parameters of the earthquake are obtained, then the rupture parameters are calculated. With the help of WinITDB model the maximum height of the tsunami wave is calculated. From the wave equation for shallow waters and with the bathymetry data the arrival times of the first wave are calculated. For calculating the "run-up" or maximum height of flooding, a dynamic and energetic model of one particle is used. This will allow the elaboration of a flooding map, which will be usefulness for mitigation of the disaster on the part of the corresponding authorities.

**Keywords:** Tsunami, simulation, arrival time, run-up.

### 1. Introducción

Un maremoto es un conjunto de ondas de agua de gran longitud (con períodos en el rango de 5 a 60 minutos o más), generadas por mecanismos tales como erupciones volcánicas submarinas, deslizamientos de tierra submarinos, caída de rocas a bahías o al océano y desplazamientos tectónicos asociados con terremotos. Un terremoto generador de maremotos usualmente está asociado a zonas de subducción. Dado que muchas de estas zonas se encuentran bordeando la cuenca del Pacífico, la gran mayoría de los maremotos ocurren en el Océano Pacífico.

Los maremotos se clasifican, en el lugar de arribo

a la costa, según la distancia (o tiempo de viaje) de su lugar de origen, en:

a) *Maremotos locales*, si el lugar de arribo en la costa está muy cercano o dentro de la zona de generación (delimitada por el área de dislocación del fondo marino) del maremoto, o a menos de una hora de tiempo de viaje desde su origen.

b) *Maremotos lejanos*, si el lugar de arribo está a más de 1000 km de distancia de la zona de generación o en costas extremo-opuestas a través del Océano Pacífico y a aproximadamente medio

día o más de tiempo de viaje del maremoto desde esa zona.

Según las crónicas, en 1746 el Callao fue destruido por un maremoto local que generó varias olas (con una duración total de más de 6 horas), una de las cuales alcanzó más de 10 metros de altura, con un run-up de 24 metros y una distancia de inundación de hasta 4 km. Hubo más de 5,000 muertos, con tan solo 200 sobrevivientes; probablemente sea el maremoto más destructivo registrado a la fecha en el Perú. Diecinueve barcos, incluidos los de guerra, fueron destruidos y uno de ellos fue varado a 1.5 km tierra adentro. También hubo destrucción en los puertos de Chancay y Huacho (Ortega et al., 2008).

El periodo de recurrencia de este tipo de evento para la región del Perú y norte de Chile es de 100 años (Kulikov et al., 2005). Los parámetros hipocentrales deducidos (Carpio et al., 2002) fueron los siguientes:

Hora local = 28 Oct 1746 22h 30m  
 Latitud = -12.0  
 Longitud = -77.2  
 Profundidad = 30 km  
 Magnitud = 8.6 Mw  
 Intensidad = X en Lima, Callao  
 Localización: 9 km al Nor Oeste del Callao

Estos parámetros hipocentrales no son exactamente reales, puesto que se deducen a partir de la información histórica disponible y de los catálogos sísmicos basados en parámetros macro sísmicos. Todo el trabajo posterior se basa en estos hipotéticos parámetros, por lo que la única forma de validar los resultados es mediante la comparación del run-up obtenido teóricamente y el observado históricamente.

## 2. Area de estudio

La Provincia Constitucional del Callao, se encuentra ubicada en la costa central del Perú, al oeste de Lima y limitando con el litoral costero, entre los valles de los ríos Rímac y Chillón, entre los 11.8 y 12.1 grados de latitud Sur. Su capital es la ciudad del Callao. Territorialmente abarca una extensión de 147,850 km<sup>2</sup>, en la actualidad cuenta con una población de 830,730 habitantes. La provincia Constitucional del Callao, concentra aproximadamente el 80% de las industrias de Lima. Así mismo el puerto y el aeropuerto del Callao, son receptores igualmente de aproximadamente 85% de pasajeros y carga, tanto

de ingreso como de salida. Políticamente está administrado por el Gobierno Regional del Callao, que posee un presupuesto propio y autónomo del Gobierno Central.

Para la modelado de la zona de inundación por maremoto de la Región Callao, se definió un área de estudio comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas: 11,91° a 12,08° de latitud sur y entre 77,25° a 77,06° de longitud oeste (ver Figura 4).

## 3. Cálculo de los parámetros focales

A partir de las relaciones empíricas de Papazachos 2004, entre la magnitud de momento sísmico  $M_w$  y los parámetros focales: longitud  $L$ (km), ancho  $W$ (km), y dislocación  $U$ (m) de la falla para zonas de subducción:

$$\begin{aligned} \log(L) &= 0.55M - 2.19 \\ \log(W) &= 0.31M - 0.63 \\ \log(U) &= 0.64M - 2.78 \end{aligned} \quad (1)$$

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Longitud de ruptura:  $L = 347$  km  
 Ancho de ruptura:  $W = 109$  km  
 Dislocación de la falla:  $U = 5.3$  m

Se asume que el área de ruptura tiene una forma elíptica con el eje mayor orientado en la dirección de la línea de costa (ver Figura 1). Para esta superficie de ruptura de geometría elíptica de igual área  $S$  y parámetros  $a$  y  $b$  proporcionales a  $W$  y  $L$ , tenemos los siguientes parámetros: (los factores de corrección sirven para estabilizar la excentricidad de la elipse para valores altos de la magnitud)

$$\text{Semieje menor: } a = 1.11 \frac{W}{\sqrt{\pi}} = 68 \text{ km}$$

$$\text{Semieje mayor: } b = 0.90 \frac{L}{\sqrt{\pi}} = 176 \text{ km}$$

El momento sísmico  $M_0$  se define como:  $M_0 = \mu LWU = 9 \cdot 10^{21}$  Nm. donde  $\mu = 4.5 \cdot 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> es el módulo de rigidez del medio. Talandier (1993), proporciona una relación entre el momento sísmico  $M_0$  y el potencial destructivo de un maremoto. Por regla general, en los centros internacionales de alerta de maremotos del Pacífico el umbral de alerta por maremoto se establece en  $10^{20}$  Nm. Todos aquellos terremotos con momento sísmico igual o mayor son potencialmente maremotogénicos. El valor del momento sísmico  $M_0$  indica que el terremoto del

Callao generó un maremoto destructivo.

Rango de valores	Tipo de maremoto
$Mo < 10^{20}$ Nm	No se genera maremoto
$10^{20} < Mo < 10^{21}$ Nm	Probable maremoto pequeño y local
$10^{21} < Mo < 5 \cdot 10^{21}$ Nm	Maremoto pequeño
$5 \cdot 10^{21} < Mo < 2 \cdot 10^{22}$ Nm	Potencialmente destructivo
$Mo > 2 \cdot 10^{22}$ Nm	Grande y destructivo

Tabla 1. Clasificación de maremotos

#### 4. Generación del maremoto

Para que un sismo genere un maremoto es necesario que cumpla los siguientes requisitos:

a) Que el epicentro del sismo, o una parte mayoritaria de su área de ruptura, esté bajo el lecho marino y a una profundidad menor a 60 km (sismo superficial).

b) Que ocurra en una zona de hundimiento de borde de placas tectónicas en el mar, es decir que la falla tenga movimiento vertical y no sea solamente de desgarre con movimiento lateral.

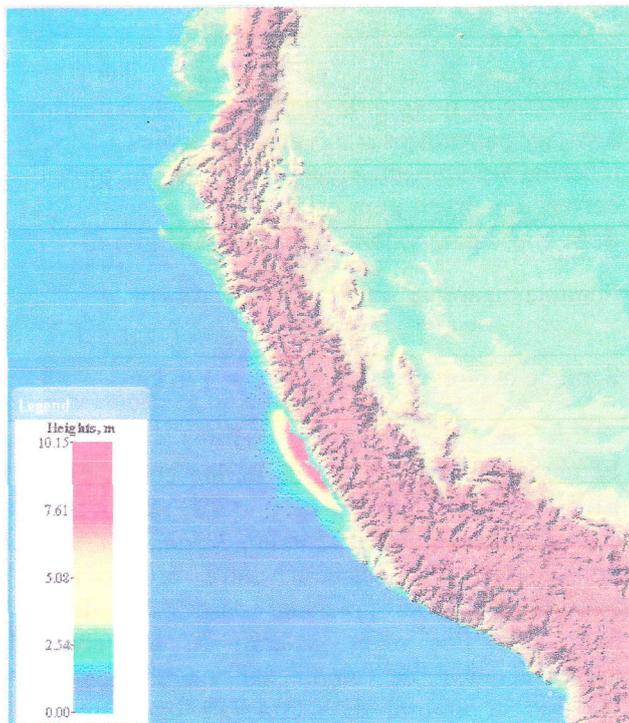


Fig. 1 Mapa de máxima altura de la ola (Modelo WinITDB)

c) Que el sismo libere suficiente energía en un cierto lapso de tiempo y que ésta sea eficientemente transmitida. Por lo general, para una magnitud  $M_w > 7.0^o$  se activan los sistemas de alerta de maremoto.

La condición inicial del maremoto (campo de deformación debido a la dislocación de la falla geológica) se determina empleando el modelo de *Mansinha y Smylie (1971)* que asume una deformación instantánea de la superficie del océano igual a la componente vertical del campo de deformación del lecho marino. Este es un modelo de fractura y requiere conocer el mecanismo focal del terremoto. Los parámetros focales obtenidos en el ítem anterior son utilizados como datos de entrada del modelo WinITDB, Windows Integrated Tsunami Data Base, (*Gusiakov et al. 2007*) el cual genera un mapa de máxima altura de olas (ver *Figura 1*), este último dato se utilizará para generar el modelo de inundación y un mapa de tiempos de arribo (ver *Figura 2*).

#### 5. Fase de propagación - Estimación del tiempo de arribo

El modelo WinITDB (así como otros modelos) utiliza las siguientes ecuaciones lineales para la propagación del maremoto a través del fondo oceánico en aguas someras (*Pedlosky, 1986*):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + gh \nabla \eta = 0 \quad (3)$$

Donde  $\eta$  es la perturbación del nivel del mar,  $U$  representa la velocidad,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $h$  es la profundidad y  $t$  es el tiempo.

También, es de mucha importancia conocer los tiempos de arribo de la primera ola del maremoto a los distintos puertos y localidades para dar la alerta respectiva. Se realizará la estimación del tiempo de arribo del maremoto teniendo en cuenta que la longitud de onda del maremoto es mucho mayor que la profundidad del mar, en este caso podemos obtener la ecuación de onda. Derivando la ecuación (2), calculando la divergencia de la ecuación (3) y restándolas se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - gh \nabla^2 \eta = 0$$

De donde, la velocidad de propagación de las ondas para aguas someras será:

$$v = \sqrt{gh(r)} \quad (4)$$

Pero,  $v = \frac{dr}{dt} \Rightarrow dt = \frac{dr}{v} = \frac{dr}{\sqrt{gh(r)}}$

de donde:  $T = \int_c \frac{dr}{\sqrt{gh(r)}} \quad (5)$

C representa la trayectoria o camino seguido por la onda para un tiempo mínimo. La batimetría  $h(r)$  se obtiene a partir del modelo "Etopo2v2" (Smith et al., 2006) para toda la región del mar del Perú. Por interpolación 2D se halla la profundidad del lecho marino en el epicentro.

Se divide la trayectoria que une al epicentro con la localidad especificada en "n" particiones. Se calcula la profundidad para cada partición y se forma el perfil  $h(r)$ . Finalmente el tiempo de arribo se calcula mediante integración numérica por el método de Simpson 1/3. En algunos casos se añade un factor de corrección.

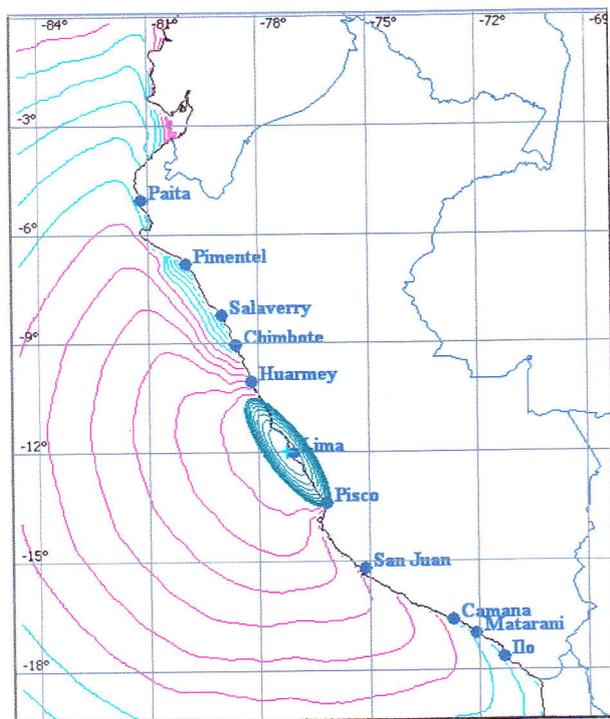


Fig. 2 Mapa de tiempos de arribo: cada isócrona representa 10 min (WinITDB)

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos por este modelo y se comparan con los del WinITDB, se puede apreciar que la diferencia es mínima y que existe una buena concordancia.

Puertos	Este modelo	WinITDB
Zorritos	1:39	1:40
Paita	1:29	1:15
Huaramey	0:32	0:25
Callao	0:09	0:05
Pisco	0:30	0:20
San Juan	0:49	0:45
Matarani	1:19	1:10
Ilo	1:29	1:20

Tabla 2: Tiempos de arribo de la primera ola

### 6. Fase de inundación. Cálculo del RUN-UP

La deducción de las ecuaciones de este ítem ha sido realizada por los autores. Como aproximación, se empleará un análisis dinámico y energético a partir de las leyes de la conservación de la energía y de las leyes de la dinámica de una partícula. Esta aproximación es aplicable a una región geográfica puntual y específica. Para los parámetros focales calculados y con la ayuda del modelo WinITDB se calculará la máxima altura de la ola. Consideremos el diagrama de la Figura 3, aplicando el teorema del Trabajo y la Energía:

$$mgh + \frac{1}{2}mv^2 = mgH + f_r d \quad (6)$$

Donde:  $h$  = altura de la ola  
 $H$  = altura del run-up

La fuerza de rozamiento es:

$$f_r = \mu N = \mu mg(\cos \alpha) d \quad (7)$$

Donde:  $\mu$  = coeficiente de rozamiento  
 $\alpha$  = ángulo de inclinación de la pendiente

Luego:

$$mgh + \frac{1}{2}mv^2 = mgH + \mu(mg \cos \alpha) d$$

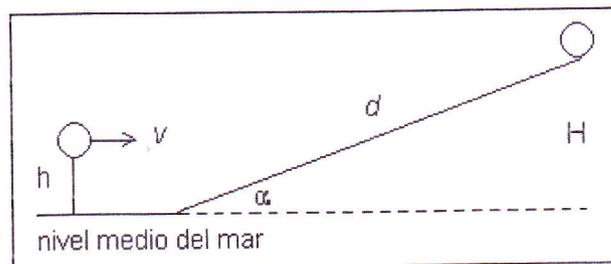


Fig. 3 Esquema del modelo dinámico de una partícula

De donde:

$$H = h + \frac{v^2}{2g} - \mu d \cos \alpha \quad (8)$$

Pero, de la Figura 2:

$$\text{sen} \alpha = \frac{H}{d}$$

Entonces:

$$d = \frac{H}{\text{sen} \alpha}$$

Reemplazando:

$$H = \frac{(v^2 / 2g) + h}{1 + \mu \cdot \text{ctg} \alpha} \quad (9)$$

El coeficiente de fricción  $\mu$  y el coeficiente de rugosidad de Manning  $\eta$  para fluidos están relacionados mediante la fórmula:

$$n = \sqrt{\frac{\mu D^{1/3}}{2g}}$$

De donde:

para  $D \approx h/2$

$$\mu = \frac{2gn^2}{D^{1/3}}$$

Finalmente:

$$H = \frac{(v^2 / 2g) + h}{1 + \frac{2gn^2}{(h/2)^{1/3}} \text{ctg} \alpha} \quad (10)$$

Para los siguientes valores numéricos:

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$   
 $v = 60 \text{ km/h}$

$h = 10 \text{ m}$  (máxima altura de ola, del modelo WinITDB)  
 $\alpha = 1^\circ$  (inclinación de la pendiente topográfica)  
 $n = 0.015$  (coeficiente de rugosidad de Manning)

Obtenemos un run-up:  $H = 21.1 \text{ m}$ . Este resultado concuerda con los datos de observación históricos de 24 m de run-up, considerando la corrección de la marea alta, el run-up podría haber sido de 23 m.

La Figura 4 muestra un mapa de inundación para este evento, restringida a la región comprendida entre las latitudes  $-12.08^\circ$  y  $-11.91^\circ$ . Los datos de la topografía del Callao fueron obtenidos de "Shuttle Radar Topographic Mission" SRTM (Jarvis et al., 2006), topografía satelital con una resolución de  $3''$  (90 m en el Ecuador). Se observa que la inundación llegaría hasta antes del actual Ovalo de la Perla y hasta parte de la pista del Aeropuerto Jorge Chávez (pequeño círculo rojo), entre otros puntos de referencia. La mancha azul aislada representa al cerro La Regla, el cual sería un punto de evacuación natural. Las coordenadas de los puntos de inundación se pueden cambiar de formato ASCII a formato KML o KMZ para ser leídos por el programa Google Earth, en el cual se apreciarían las avenidas y calles afectadas por la inundación del maremoto (ver Figura 5). El archivo se encuentra en la siguiente dirección:

<http://cjimenez.741.com/tsunami1746.kmz>  
<http://cjimenez.741.com/tsunami1746.pdf>

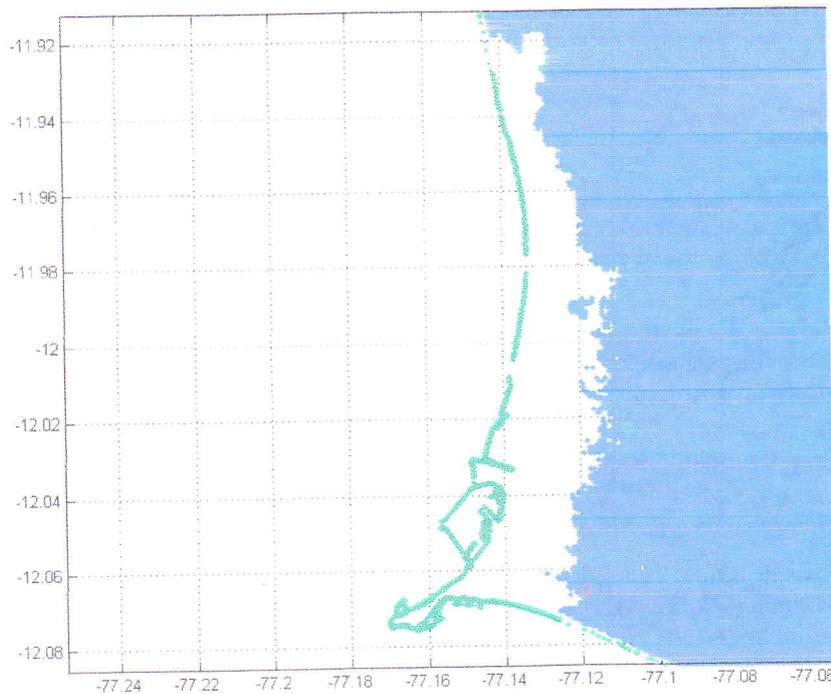


Fig. 4 Mapa de inundación para el Callao. El color azul indica la zona no-inundable

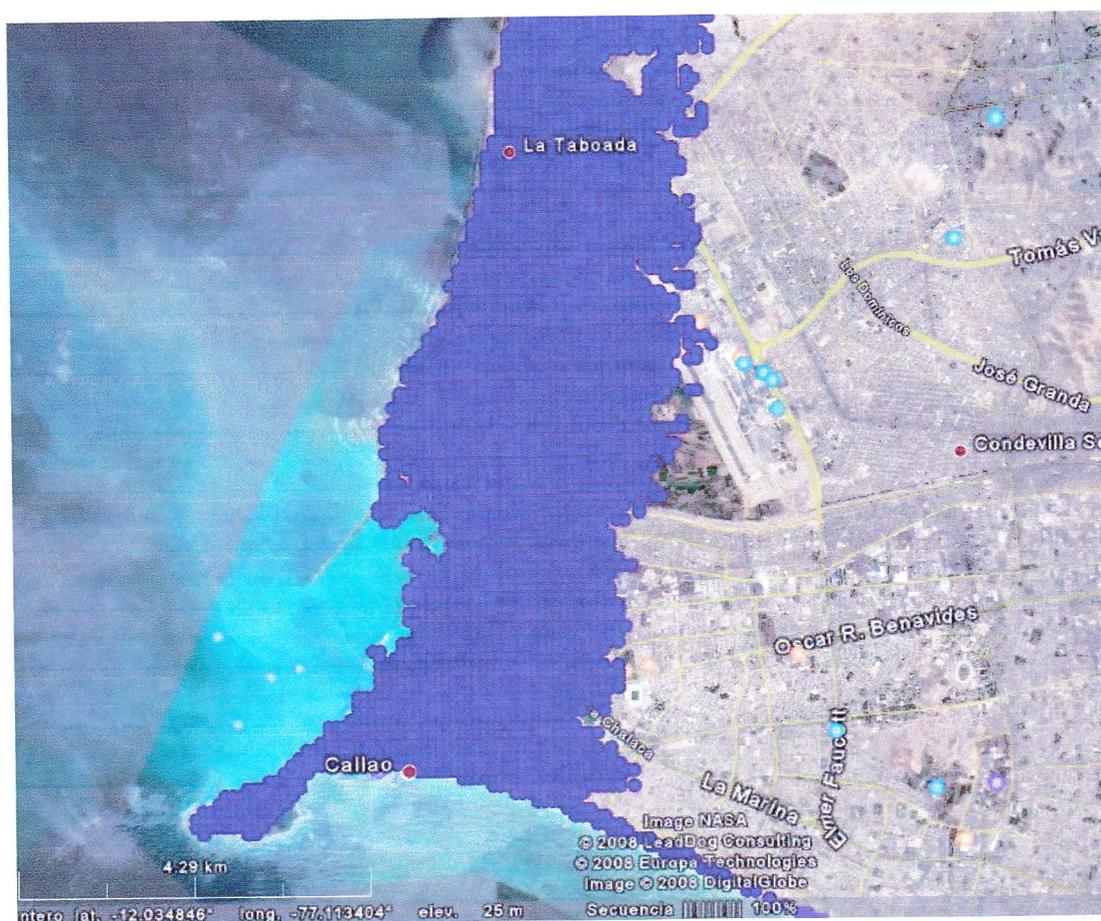


Fig. 5 Mapa de inundación utilizando el programa Google Earth

## 7. Conclusiones

Los parámetros hipocentrales no son exactamente reales, puesto que se deducen a partir de la información histórica disponible y de los catálogos sísmicos basados en parámetros macro sísmicos.

La ciudad del Callao está asentada en una zona altamente vulnerable ante la ocurrencia de un maremoto, lo que significa que en el futuro puede ocurrir un evento similar al de 1746.

El valor del momento sísmico  $M_0 = 9 \cdot 10^{21}$  Nm calculado en el presente trabajo indica que el terremoto del Callao de 1746 generó un maremoto destructivo.

Para un maremoto local, como el de 1746, el tiempo de arribo de la primera ola sería entre 5 y 9 minutos, lo cual proporciona poco tiempo para realizar una evacuación. Sin embargo, no siempre la primera ola es la más grande.

El run-up (máxima altura de inundación) del maremoto de 1746 llegó a una cota de 21 m, lo

que implica que algunos lugares como parte de las pistas del Aeropuerto Jorge Chávez y parte de la Refinería La Pampilla, entre otros, serían puntos potencialmente inundables.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo corresponden a un modelo físico matemático que, en cierta medida, están validados por los datos y testimonios históricos.

## 8. Bibliografía

Carpio, J., Tavera, H. 2002. Estructura de un Catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catálogo de Gusiakov. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 94, p. 45-49.

Gusiakov, V., Marchuk, A., Chubarov, L. WinITDB/WLD (2007) Integrated Tsunami Database for the World Ocean. Tsunami Laboratory, ICMG SD RAS, Nobosibirsk, Russia.

Jarvis A., Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2006. Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.

Kulikov, E., Rabinovich, A., Thomson, R. 2005. Estimation of Tsunami Risk for the Coasts of Peru and Northern Chile. *Natural Hazards* vol. 35, p. 185-209.

Mansinha, L., Smylie, E. 1971. The displacement field of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V. 61, No 5, pp. 1433-1440.

Ortega, E., Jiménez, C., 2008. *Revista de Tsunamis*. Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú.

Papazachos, B., 2004. Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of Earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of Greece* vol. XXXVI, p. 1482-1489.

Pedlosky, J. 1986. *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer. 3ra edición. New York. 710 pp.

Smith, W., Sandwell, D. 2006. (ETOPO2v2) 2-minute Gridded Global Relief Data. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/06mgg01.html>

Talandier J., 1993. French Polynesia Tsunami Warning Center (CPPT). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7, p. 237-256.